

УДК 621.373.826.038.825.4

¹В.І. Олійник²Є.І. Олійник³В.М. Шмаров, канд. техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНОЇ АНАЛОГОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЛАЗЕРІВ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТІВ СТАРІННЯ

¹Науково-виробниче підприємство “Темп”²Науково-виробниче об’єднання “Метрологія”³Аерокосмічний інститут НАУ

Досліджено амплітудно-частотні характеристики напівпровідникових лазерів інжекційного типу. Виконано вимірювання коефіцієнтів нелінійних перекручувань і глибини амплітудної модуляції таких лазерів у режимі струмової надвисокочастотної модуляції. Експериментальні дослідження проведено з використанням напівпровідникових лазерів після їх тривалого складського зберігання, що моделює ефекти старіння.

Вступ

У системах оптичного дистанційного зондування, застосовуваних у геодезії, у енергетичному машинобудуванні для неконтактної технічної діагностики параметрів і форми великогабаритних вузлів і деталей, у авіабудуванні, суднобудуванні тощо, сьогодні широко використовуються як джерела випромінювання інжекційні напівпровідникові (ІНП) лазери. Такі ІНП допускають пряму струмову модуляцію вихідного оптичного інформаційного сигналу, зокрема надвисокочастотну (НВЧ) модуляцію, при достатньо великій потужності оптичного випромінювання і тому найбільш перспективні для застосування в системах дистанційного визначення форми і параметрів складних поверхонь з великомасштабною неоднорідністю.

Сучасні напівпровідникові лазери працюють у широкому діапазоні оптичних довжин хвиль – від видимого до інфрачервоного.

Використання в системах дистанційного зондування таких лазерів дозволяє створити мобільні засоби визначення параметрів і форми складних поверхонь неполірованих великогабаритних виробів, у тому числі спеціальні захисні покриття. Точнісні характеристики і розрізнявальна здатність подібних засобів визначаються частотними параметрами джерел випромінювання, спектральною чистотою інформаційного сигналу і глибиною його модуляції. Особливо важливо застосування таких засобів у системах оперативного діагностичного контролю при проведенні ремонтно-будівельних робіт поза заводськими стаціонарними умовами.

Режими випромінювання різного типу ІНП лазерів раніше досліджувалися різними авторами [1; 2], але ці дослідження були проведені без урахування ефектів їх старіння.

Зміна режимів випромінювання лазерів з урахуванням ефектів їх старіння має велике значення у практиці застосування дистанційних засобів для зазначених цілей протягом тривалого терміну їх експлуатації.

Дослідження режимів випромінювання інжекційних напівпровідникових лазерів у режимі струмової амплітудної модуляції

Авторами досліджені деякі типи непромислових зразків лазерів з довжиною хвилі випромінювання 0,85 мкм для оптимізації їх режимів випромінювання при прямій струмовій НВЧ модуляції з урахуванням їх старіння для застосування в системах дистанційного визначення параметрів складних поверхонь.

Як відомо, динамічні режими ІНП випромінювачів описуються рівняннями [3]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{e} - \frac{N}{\tau_s} - \alpha NP; \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha NP - \frac{P}{\tau_p} + \beta \frac{N}{\tau_s}, \quad (2)$$

де d – товщина активного шару лазера; e – заряд електрона; N – концентрація носіїв заряду; τ_s – час спонтанної випромінювальної рекомбінації носіїв; α – коефіцієнт оптичного посилення; P – щільність фотонів в моді резонатора; τ_p – час життя фотона в резонаторі; β – частка спонтанного випромінювання, що попадає в лазерну моду.

З рівняння (1) випливає, що швидкість зміни концентрації носіїв заряду пропорційна швидкості струму інжекції ($\frac{J}{e}$ – перший доданок) і зменшується пропорційно швидкості втрат як носіїв при спонтанній рекомбінації ($\frac{N}{\tau_s}$ – другий

доданок), так і втрат за рахунок стимульованої рекомбінації (αNP – третій доданок).

Фізичний зміст рівняння (2) полягає в такому: швидкість зміни щільності фотонів пропорційна швидкості народження фотонів під час стимульованого випромінювання (αNP – перший доданок) з урахуванням швидкості спонтанного випромінювання фотонів у лазерну моду ($\beta \frac{N}{\tau_s}$ – третій доданок) за винятком дисипативних втрат фотонів у резонаторі ($\frac{P}{\tau_p}$ – другий доданок).

Рівняння (1) і (2) лінеаризуються при малих відхиленнях від стаціонарних рішень у припущенні, що:

$$P = P_0 + p e^{i\omega t}, \quad (3)$$

$$N = N_0 + n e^{i\omega t}, \quad (4)$$

$$J = J_0 + j e^{i\omega t}. \quad (5)$$

Підставляючи вирази (3) – (5) у рівняння (1) і (2), розділивши змінні на стаціонарні і синусоїдальні, які мало змінюються, і опускаючи члени другого порядку малості (добутку малих членів), можна одержати:

$$i\omega_n = j - n(1 + P_0) - p N_0; \quad (6)$$

$$i\omega_p = \gamma(n_0 + p N_0 + \beta n), \quad (7)$$

де $\gamma = \tau_s / \tau_p$.

З рівнянь (6) і (7) можна визначити передавальну функцію для щільності фотонів у режимі модуляції слабким сигналом у вигляді:

$$p = \frac{j\gamma(P_0 + \beta)}{(i\omega + 1 + P_0)(i\omega + \gamma - \gamma N_0) + \gamma N_0(P_0 + \beta)}, \quad (8)$$

де P_0 – нормована щільність фотонів.

Рівняння (8) дозволяє одержати приблизне значення граничної частоти (у безрозмірному вигляді), яке описується виразом:

$$f_{гр} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\gamma P_0}.$$

Фаза вихідного модульованого сигналу може змінюватися від 0 до 180° , при цьому крутість зміни фази на граничній частоті при малій добротності резонатора, що залежить від параметра β , значно нижче крутості зміни фази при великих добротностях [3].

Слід також зазначити, що амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) інжекційного лазера може мати пікові значення (сплески). Це пояснюється тим, що навіть при малих значеннях струмів зсуву є резонансний пік, обумовлений параметром β (згідно з рівнянням (8)).

Динамічні характеристики інжекційного лазера описуються і модифікованими рівняннями:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{C_{sc}}{de} \frac{dV}{dt} + \frac{J}{de} - \frac{N}{\tau_s} - \alpha NP; \quad (9)$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha NP - \frac{P}{\tau_p} + \beta \frac{N}{\tau_s}, \quad (10)$$

в яких (див. рівняння (9)) врахований перший доданок (додатковий), де C_{sc} – зарядова ємність; V – напруга на p - n переході.

Використовуючи функціональну залежність між щільністю струму носіїв та напругою на p - n переході

$$N = N_0 [\exp(eV/\eta k T) - 1] \quad (11)$$

і лінеаризуючи систему рівнянь (9) – (11) у наближенні малого сигналу за наведеною методикою, можна одержати вираз для змінних складових струму і напруги у вигляді:

$$i = V(\frac{1}{R} + j\omega C_t) + \alpha N_0 P; \quad (12)$$

$$V(\frac{\beta}{R_d} + \frac{\beta \gamma N_0}{G_3 R_d}) = \alpha P (G_3 + j\omega); \quad (13)$$

$$C_t = C_d + C_{sc};$$

$$G_3 = \frac{\alpha \beta G_0 N_0}{\tau I_0 - N_{0\alpha}};$$

$$G_0 = \gamma (N - N_0);$$

$$C_d = \tau / R_d;$$

$$R_d = 2\tau k T / e \alpha N_0,$$

де C_t – повна діодна ємність; G_0 – оптичний хвильовидний параметр; R_d – малосигнальний опір p - n переходу.

Рівняння (12)–(13) дозволяють побудувати електричну модель інжекційного напівпровідникового лазера в наближенні малого сигналу з визначення його провідності, яка дорівнює i/V .

Параметри моделі визначають АЧХ лазера і його режими випромінювання.

Були досліджені напівпровідникові $GaAlAs$ -інжекційні лазери (непромислові) смугового і канального типів з довжиною хвилі випромінювання 0,85 мкм, що працюють у маломодовому режимі і які знаходилися більше ніж п'ять років у режимі складського збереження в нормальних кліматичних умовах, з метою визначення (та зміни) їх АЧХ і оптимізації їх високочастотних параметрів. На лазери подавався високочастотний сигнал з постійним зсувом. Вимірювання активної і реактивної складових повного опору здійснювалося з використанням приладу Р4-37 за коефіцієнтом відображення.

У смугових структурах лазерів із шириною смугового контакту до 12 мкм вбудовані хвилеводи не використовувалися.

У лазерах каналного типу застосовувалась структура типу “канал у підкладці”, яка має ширину активної області до 6 мкм.

Вихідна потужність випромінювання лазерів сягала 10 мВт. Результати досліджень АЧХ ілюструє рис. 1.

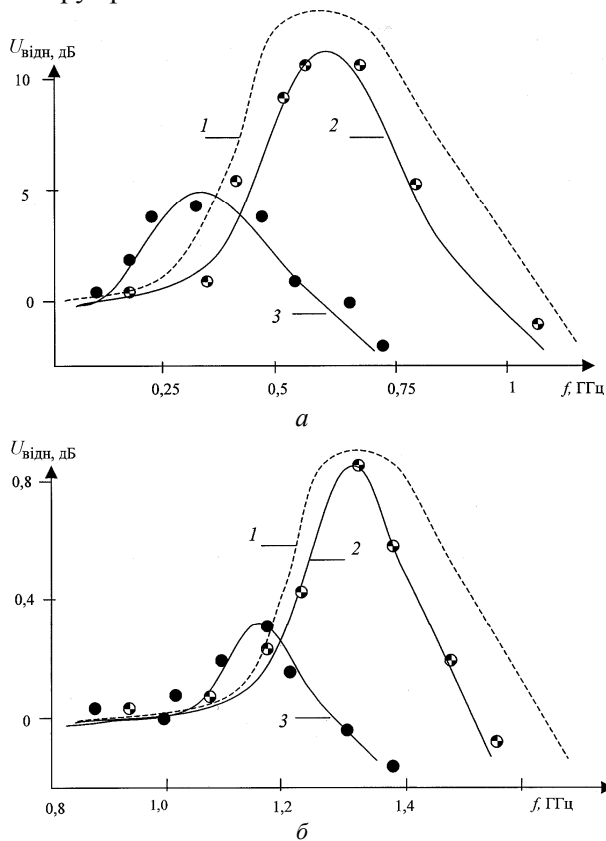


Рис. 1. Порівняльні АЧХ смугового (а) і каналного (б) одночастотних інжекційних лазерів:

а: 1 – закордонного виробництва (NDL 7130 DM) при струмі 85 мА; 2 – вітчизняного виробництва при струмі 90 мА; 3 – вітчизняного виробництва при струмі 75 мА;

б: 1 – закордонного виробництва при струмі 80 мА; 2 – вітчизняного виробництва при струмі 75 мА; 3 – вітчизняного виробництва при струмі 60 мА

З наведених результатів вимірювань видно, що для напівпровідникового інжекційного лазера смугового типу АЧХ мають різко виражений резонансний характер, максимум якого збільшується майже лінійно залежно від зростання струму інжекції і зсувається в бік високих частот.

При струмах інжекції в межах 70–100 мА зсув максимуму АЧХ знаходиться у межах 0,5–0,95 МГц.

Інжекційний лазер каналного типу більш широкопasmовий, ніж смуговий.

До частот порядку 1,0 МГц його АЧХ має частотно неселективний характер, що пояснюється відсутністю мимовільних пульсацій при малих перевищеннях струму накачування відносно граничного струму через наявність вбудованого хвилеводу, але зі зростанням струму інжекції починає виявлятися резонансний характер АЧХ. Зсув максимуму АЧХ із зростанням струму накачування носить нелінійний характер.

Однак інтенсивність випромінювання напівпровідникового інжекційного лазера смугового типу в резонансних областях АЧХ майже на порядок вище, ніж у лазера каналного типу. При цьому граничний струм і струм інжекції в максимумі АЧХ у лазера смугового типу майже на 10–15 % вище, ніж у лазера каналного типу.

Досліджено передатні характеристики цих типів лазерів з метою оптимізації режимів модуляції і накачування. Результати вимірювань показані на рис. 2.

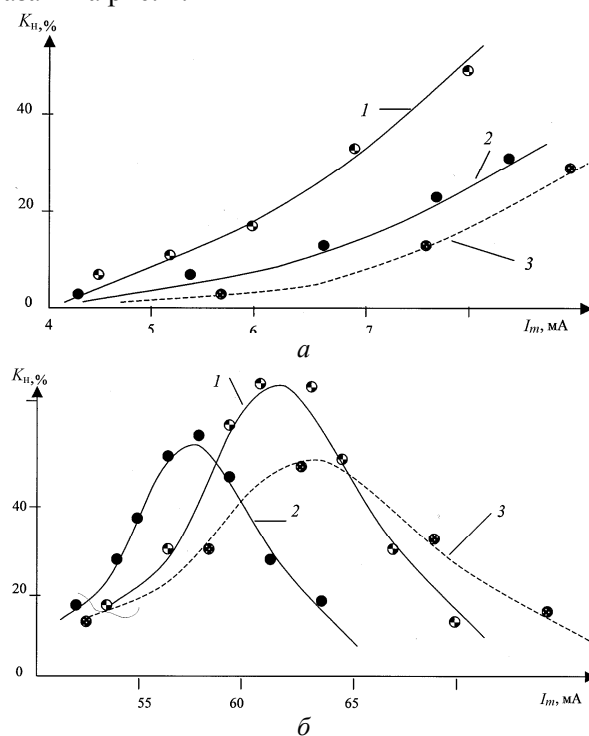


Рис. 2. Порівняльні залежності коефіцієнта нелінійних перекручувань від струму модулюючого сигналу для смугових (а) і каналних (б) інжекційних лазерів:

1 – вітчизняного виробництва при частоті модуляції 800 МГц; 2 – вітчизняного виробництва при частоті модуляції 450 МГц; 3 – закордонного виробництва при частоті модуляції 900 МГц

Для обох типів лазерів передатна характеристика істотно залежить від частоти модуляції: для смугового – вона має нелінійний нерезонансний характер; для каналного – різко виражений резонансний характер.

Якщо визначити коефіцієнт нелінійності як відношення амплітуди другої гармоніки сигналу до амплітуди першої гармоніки (для оцінок використовувався спектроаналізатор), то такий коефіцієнт нелінійності для лазерів смугового типу залежить нелінійно (і не носить резонансний характер) як від струмів накачування, так і від частот модуляції. Зі зростанням частоти модуляції він знижується, а зі зростанням струмів накачування – збільшується.

Для лазерів каналного типу ця залежність інша.

Коефіцієнт нелінійності для лазерів каналного типу залежить від струму накачування і має резонансний характер зі зміною зсуву, причому максимум коефіцієнта нелінійності зміщується в бік більш високих частот модуляції.

Нелінійність передатної характеристики лазерів обумовлена нелінійністю їх ват-амперної характеристики, що істотно знижується зі зменшенням струму накачування.

Якщо вибрати лінійний режим порушення напівпровідникового інжекційного лазера (лінійна ділянка ват-амперної характеристики при відомих значеннях I_0 з відповідним визначенням P_0), то коефіцієнт глибини амплітудної модуляції інформаційним синусоїдальним сигналом $M_{ам}$ (з потужністю $P_{эф}$) можна визначити як відношення (при відомому значенні погоджувального навантаження $R_n = 50 \text{ Ом}$):

$$M_{ам} = \frac{P_{эф}}{P_0}.$$

Оскільки резонансний максимум на АЧХ у каналному напівпровідниковому лазері значно демпфується (майже на 20 дБ порівняно з смуговим лазером), об'єктом дослідження був смуговий інжекційний лазер для отримання високих значень $M_{ам}$ і вихідної випромінюваної потужності в одночастотному режимі генерації.

У лазерах застосовувався спеціальний режим охолодження. Досліджено залежності коефіцієнта глибини модуляції від потужності збудливого інформаційного сигналу.

Результати досліджень показані на рис. 3.

З наведених результатів досліджень випливає, що коефіцієнт глибини модуляції лінійно залежить на ділянці ват-амперної характеристики лазера від потужності інформаційного збудливого сигналу, причому крутість цієї залежності падає зі збільшенням частоти модуляції (більш ніж у 1,5 рази при зміні частоти модуляції від 50 до 1,1 МГц).

Така залежність дозволяє одержати коефіцієнт глибини модуляції в межах від 25 до 75 %.

При цьому вихідна потужність випромінювання напівпровідникового лазера сягала близько 0,1 Вт.

При великих струмах накачування лазер переходить у багаточастотний режим генерації і функціональна залежність коефіцієнта глибини модуляції від потужності інформаційного сигналу переходить у нелінійний режим (режим насичення) при $M_c > 90 \%$.

Отримані результати узгоджуються з результатами праці [4].

Фазочастотну характеристику (ФЧХ) можна розрахувати, виходячи з рівняння (8).

Виконані розрахунки та отримані результати вимірів АЧХ показують, що фаза вихідного модульованого випромінювання може різко змінюватися: від 0 до мінус 180° . При цьому на граничній частоті АЧХ крутість ФЧХ збільшується у зв'язку зі зростанням еквівалентної добротності, а при низьких величинах еквівалентної добротності залежність ФЧХ від частоти модулюючого сигналу має плавний характер.

Висновки

1. Виконано експериментальні дослідження режимів вітчизняних ІНП лазерів смугового і каналного типів після реалізації режиму старіння в результаті тривалого складського збереження і проведено їх порівняння з лазерами подібного типу закордонного виробництва.

2. Визначено АЧХ таких лазерів у широкому діапазоні модулюючих частот – до 1000 МГц.

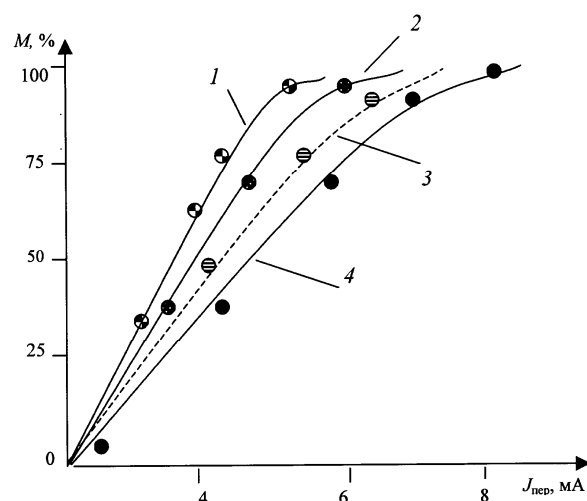


Рис. 3. Залежність глибини модуляції від струму накачування для інжекційних смугових лазерів:

1 – вітчизняного виробництва при частоті модулюючого сигналу 400 МГц; 2 – вітчизняного виробництва при частоті модулюючого сигналу 600 МГц; 3 – вітчизняного виробництва при частоті модулюючого сигналу 850 МГц; 4 – закордонного виробництва при частоті модулюючого сигналу 1000 МГц

Дослідження показали, що інжекційні лазери каналного типу більш широкосмугові, ніж смугові. Однак смугові ІНП лазери мають більш високі енергетичні параметри.

3. Обчислено коефіцієнти нелінійних перекручувань інформаційного (модуючого) сигналу при різних частотах струмової модуляції.

Результати проведених вимірювань показали, що коефіцієнти нелінійних перекручувань зі зростанням частоти модулюючого струму збільшуються. Проведено експериментальну оцінку глибини амплітудної модуляції інформаційного сигналу залежно від модулюючого струму при різних частотах НВЧ модуляції в діапазоні частот до 1 МГц. Показано, що при зростанні струму модуляції і частоти модуляції коефіцієнт глибини амплітудної модуляції зменшується.

Аналіз результатів експериментальних досліджень для оцінки основних параметрів ІНП лазерів, що знаходилися в нормальних кліматичних умовах на складському збереженні більше ніж п'ять років, показав, що їхні параметри і характеристики частково деградують.

У цьому випадку лазерні джерела випромінювання підлягають періодичній атестації, що необхідно враховувати під час виготовлення і практичного застосування лазерних засобів дистанційного зондування, які мають великий термін експлуатації.

Список літератури

1. Lau K. Y., Yariv A. IEEE J. QE-21. – 1985. – №1. – P. 121.
2. Su C.B., Lanzisera V.A. IEEE J. QE-22. – 1986. – №6. – P. 1568.
3. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры / Пер. с англ.; Под ред. Л.А. Ривлина. – М.: Радио и связь, 1990. – 320 с.
4. Lan K.Y., Hardner Ch., Yariv A. Appl. Phys. letters. – 1983. – V. 43. – P. 619.
5. Олейник В.И., Олейник Е.И., Шмаров В.Н. Сб. науч. тр. Первой междунар. конф. «Современная контрольно-испытательная техника промышленных изделий и их сертификация». – К.: ДАЛПУ, 1997. – С. 31.

Стаття надійшла до редакції 06.10.04.

В.И. Олейник, Е.И. Олейник, В.М. Шмаров

Исследование амплитудной аналоговой модуляции полупроводниковых лазеров с учетом эффектов старения

Исследованы амплитудно-частотные характеристики полупроводниковых лазеров инжекционного типа. Выполнены измерения коэффициентов нелинейных перекручиваний и глубины амплитудной модуляции таких лазеров в режиме токовой сверхвысокочастотной модуляции. Экспериментальные исследования проведены с использованием полупроводниковых лазеров после их длительного хранения, что моделирует эффекты старения.

V.I. Oleinik, E.I. Oleinik, V.N. Shmarov

Researches of peak analog modulation of semi-conductor lasers in view of effects of ageing

Are investigated amplitude - frequency characteristics of injection semi-conductor lasers. Measurements of factors of nonlinear distortions and depths of peak modulation of such lasers in a current mode the microwave modulation are executed. Experimental researches are carried out with use of semi-conductor lasers after their long warehousing modeling effects of ageing.